

基于模糊综合评价法的全钢化真空玻璃传热性能研究

刘亚楠, 胡东方, 袁朝阳

河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2023年9月2日; 录用日期: 2023年10月18日; 发布日期: 2023年10月30日

摘要

为了改善建筑外窗带来的建筑能耗问题, 人们开始注重研发新型节能玻璃产品, 全钢化真空玻璃作为新生的节能玻璃产品, 拥有良好的保温隔热性能, 其内部真空状态消除了大部分热量对流和传导, 而低辐射膜降低了辐射传热。本文以全钢化真空玻璃为研究对象, 通过建立传热物理模型对其传热机理进行分析, 得到了全钢化真空玻璃传热性能的关键影响因素。在此基础上, 运用层次分析法确定评价因素指标权重, 利用加权平均模型对五组方案进行模糊综合评价, 并通过试验验证模糊综合评价模型的有效性。结果表明: 第五组全钢化真空玻璃的传热性能最好, 模糊综合评价模型与试验所得结果相一致, 为全钢化真空玻璃传热性能方案的优选提供了可行性参考。

关键词

全钢化真空玻璃, 传热性能, 层次分析法, 加权平均模型, 模糊综合评价

Research on Heat Transfer Performance of Fully Tempered Vacuum Glass Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

Yanan Liu, Dongfang Hu, Zhaoyang Yuan

School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: Sep. 2nd, 2023; accepted: Oct. 18th, 2023; published: Oct. 30th, 2023

Abstract

In order to improve the energy consumption issues caused by building exterior windows, people

have begun to pay attention to the development of new energy-saving glass products. Fully tempered vacuum glass, as a new energy-saving glass product, has good insulation performance. Its internal vacuum state eliminates most of the heat convection and conduction, while low radiation film reduces radiation heat transfer. This article takes fully tempered vacuum glass as the research object, analyzes its heat transfer mechanism by establishing a heat transfer physical model, and obtains the key influencing factors of the heat transfer performance of fully tempered vacuum glass. On this basis, the Analytic Hierarchy Process is used to determine the weights of evaluation factor indicators, and a weighted average model is used to conduct a fuzzy comprehensive evaluation of five groups of schemes. The effectiveness of the fuzzy comprehensive evaluation model is verified through experiments. The results indicate that the fifth group of fully tempered vacuum glass has the best heat transfer performance, and the fuzzy comprehensive evaluation model is consistent with the experimental results, providing a feasible reference for the optimization of heat transfer performance schemes of fully tempered vacuum glass.

Keywords

Fully Tempered Vacuum Glass, Heat Transfer Performance, Analytic Hierarchy Process, Weighted Average Model, Fuzzy Comprehensive Evaluation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类社会的发展,全球性能源和环境问题日益严重,世界各国对节能减排、新型绿色材料的需求愈发强烈[1][2]。在国内外节能减排的大趋势下,各国对真空玻璃的研究掀起了一股热潮,真空玻璃一经问世,便引起了国内外学者的研究[3][4]。全钢化真空玻璃作为一种新型深加工玻璃产品,在保温隔热方面具有良好的发展前景,其性能可达到近零能耗建筑及被动房对门窗、幕墙玻璃传热系数的要求[5][6][7]。

国内对真空玻璃的研究起步较晚,全钢化真空玻璃是我国玻璃工业中为数不多的具有自主知识产权的前沿产品,具有良好的发展潜力和前景,本文针对全钢化真空玻璃的传热性能进行准确的评价具有重要意义[8][9]。模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法,用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价,能较好的解决模糊的、难以量化的问题,适用各种非确定性问题的解决[10][11]。赵东亚[12]运用模糊综合评价法建立了多元评价体系,对不同方案进行综合评价,选出了综合性能最优的方案,为实际生产方案的选取提供了参考;黄广全[13]提出一种面向数控机床的元动作单元的多目标综合模糊评价关键质量特性识别方法,结合专家权重的分析结果,采用粗有序加权平均法求解评价因子的相对重要性;Li [14]采用模糊综合评价法对广州地铁沿岸地区明挖法施工风险进行评价,结果准确可靠,可为类似项目提供参考;刘海江[15]通过组合权重和隶属度函数最终构建了换挡品质模糊综合评价模型,并通过试验验证了该方法的有效性和准确性,能对换挡品质改善提出有效的指导;许国栋[16]通过模糊综合评判的方式,建立复合材料低能量冲击表面损伤与其失效的数学依据;王双华[17]对机械功能微晶玻璃的可加工性能、钻孔深度和力学性能进行了模糊综合评价。

本文根据全钢化真空玻璃的结构特征,研究全钢化真空玻璃的传热过程,分析全钢化真空玻璃传热性能的影响因素,基于模糊数学理论方法,对全钢化真空玻璃的传热性能进行模糊综合评价,利用试验验证模糊综合评价模型的可行性。

2. 全钢化真空玻璃的传热分析

2.1. 全钢化真空玻璃的结构

全钢化真空玻璃主要由两片全钢化玻璃、支撑物、四周封接材料组成。在两片全钢化玻璃之间放置若干按一定规律排列的支撑物，将两片全钢化玻璃四周边缘区域采用低温封接材料进行封接，一般有一片全钢化玻璃镀有低辐射膜，其中一片全钢化玻璃上制有抽气孔，用于抽取两片全钢化玻璃之间的气体，另一片全钢化玻璃制有盲孔，用于放置吸气剂来保持内部真空度，提高服役寿命，抽气完成后用封口片和低温焊料将抽气口密封。图 1 为全钢化真空玻璃的结构示意图。

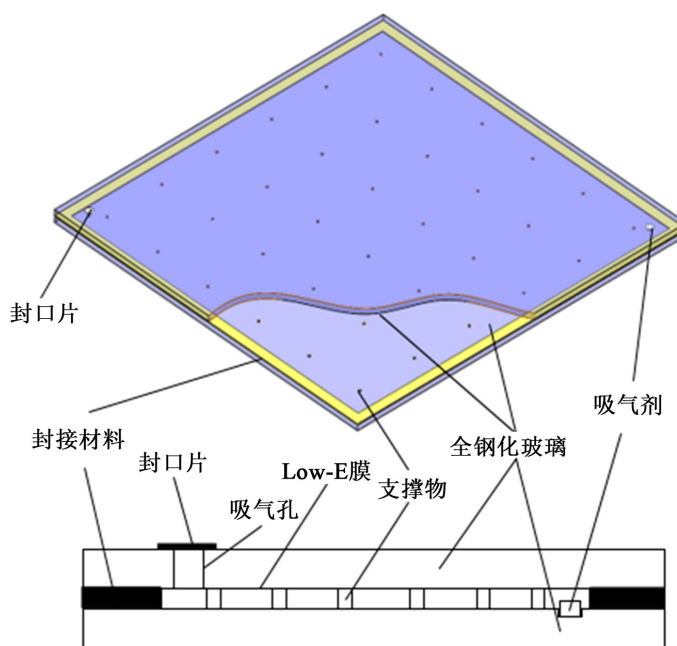


Figure 1. Structural schematic diagram of fully tempered vacuum glass
图 1. 全钢化真空玻璃的结构示意图

2.2. 传热物理模型

当玻璃在建筑外围护结构中应用时，其四周边缘区域需嵌入到玻璃框架内，随着框架尺寸和材料的改变，玻璃四周边缘区域的传热也随之改变，为了比较不同玻璃的传热性能，只研究玻璃中心区域的传热，不考虑四周边缘区域。为了直观地分析全钢化真空玻璃的传热过程，建立了传热物理模型，如图 2 所示。

全钢化真空玻璃的传热途径有以下七种：

- ① 热侧环境与全钢化玻璃 1 的热对流；
- ② 全钢化玻璃 1 的热传导；
- ③ 真空层内的热辐射；
- ④ 支撑物的热传导；
- ⑤ 全钢化玻璃 2 的热传导；
- ⑥ 冷侧环境与全钢化玻璃 2 的热对流；
- ⑦ 真空层内残余气体的热对流。

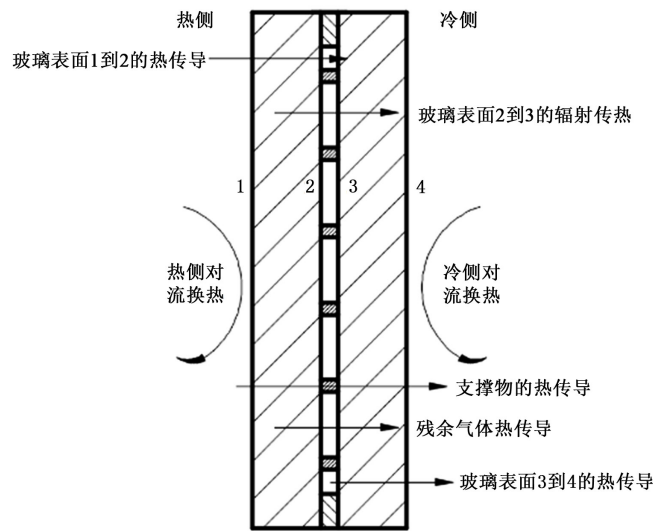


Figure 2. Heat transfer physical model of fully tempered vacuum glass
图 2. 全钢化真空玻璃的传热物理模型

2.3. 影响因素分析

全钢化真空玻璃的传热系数是指在稳定传热状态下，全钢化真空玻璃两侧环境温差为 1 K 时，单位时间从单位面积全钢化真空玻璃一侧到另一侧传输的热量。传热系数用字母 U 或 K 表示，二者检测的标准不同，但是物理意义完全相同。

全钢化真空玻璃的传热系数计算公式如式所示：

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_1} + \frac{(C_{rad} C_g C_p)^{-1}}{(C_{rad} C_g)^{-1} + (C_g C_p)^{-1} + (C_{rad} C_p)^{-1}} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_e} \quad (1)$$

式中： C_i 为室内表面对流热导； C_1 为全钢化玻璃 1 的热导； C_{rad} 为真空内辐射热导； C_g 为真空层内残余气体热导； C_p 为支撑物热导； C_2 为全钢化玻璃 2 热导； C_e 为室外表面对流热导。

玻璃室内外表面对流系数通常根据不同国家传热系数边界条件的规定取值，中国标准《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》(JGJ/T 151-2008)、欧洲标准《Glass in building-Determination of thermal transmittance (U value)—Calculation method》(EN 673-2011)和美国标准《Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality》(ASHRAE 62-2001) [18] [19] [20]的传热系数边界条件如表 1 所示。

Table 1. Boundary conditions for heat transfer coefficient of different standards

表 1. 不同标准的传热系数边界条件

标准	传热系数符号	测试条件				室内表面对流换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	室外表面对流换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
		室内温度/°C	室外温度/°C	室内空气流/(m·s ⁻¹)	室外气流/(m·s ⁻¹)		
中国	U 或 K	20	-20	自然对流	3.0	7.6	19.9
欧洲	U	20	0	自然对流	自然对流	7.7	25
美国	U	21.1	-17.8	自然对流	6.7	8.3	30

由于全钢化真空玻璃真空层间隔层与外部环境存在压差，其单位面积内需承受 10⁵ Pa 的大气压力，为了避免在压差作用下造成两片全钢化玻璃贴合，需在两片全钢化玻璃之间放置支撑物进行隔开。对称

的支撑物形状可使其受力均匀, 避免受力不均造成全钢化真空玻璃服役寿命降低, 研究发现采用圆柱形或圆环形效果非常好。当支撑物形状为圆柱时, 其热导计算如下:

$$C_p = \frac{2\lambda_G a}{b^2 \left(1 + \frac{2\lambda_G h}{\lambda_p \pi a} \right)} \quad (2)$$

当支撑物形状为圆环形时, 其热导计算如下:

$$C_p = \frac{2\lambda_G (a_e^2 - a_i^2)}{b^2 \left(a_e + \frac{2\lambda_G h}{\lambda_p \pi} \right)} \quad (3)$$

式中: a_i 为圆环形支撑物与全钢化玻璃接触区域内半径; a_e 为圆环形支撑物与全钢化玻璃接触区域外半径。

由此可知, 在其它参数不变的情况下, 支撑物热导随其高度的增大而减小; 支撑物随其材料导热系数的增大而增大; 当支撑物直径越大时, 支撑物与全钢化真空玻璃的接触面积越大, 通过支撑物的热量越多, 支撑物热导越大; 支撑物的热导随相邻支撑物间距的增大而减小; 为了使支撑物在全钢化真空玻璃上整体受力均匀, 需将支撑物按照一定规律进行布放, 在支撑物布放间距不变的情况下, 当支撑物在全钢化真空玻璃上按正六边形排布时, 全钢化真空玻璃单位面积的支撑物数量最少, 而采用正三角形排布的支撑物数量最多; 在支撑物布放方式相同的情况下, 全钢化真空玻璃单位面积的支撑物数量随布放间距的增大而减小。在全钢化真空玻璃内, 支撑物的数量越少, 通过支撑物传导的热量也越少。

真空层间辐射热导计算公式为:

$$C_{rad} = \varepsilon_{eff} \frac{\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

式中, ε_{eff} 为全钢化真空玻璃的有效辐射率。由式(4)可知, 当全钢化真空玻璃的有效辐射率越大时, 全钢化真空玻璃真空层内的辐射热导就越大。

由傅里叶定律可知, 全钢化玻璃的热导为:

$$C_G = \frac{\lambda_G}{d} \quad (5)$$

式中, λ_G 为全钢化玻璃的导热系数; d 为全钢化玻璃的厚度。

当全钢化玻璃的厚度越大时, 全钢化玻璃的热导越大。

全钢化真空玻璃内部残余气体按自由分子导热计算。由稀薄气体导热理论计算全钢化真空玻璃内部残余气体的热导为:

$$C_g = \alpha \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \sqrt{\frac{R}{8\pi M T}} \cdot P \quad (6)$$

式中: α 为气体的综合适应系数; γ 为气体比热容比; R 为摩尔气体常数; M 为气体摩尔质量; T 为真空层内两表面温度的平均值; P 为气体压强。

当全钢化真空玻璃真空层内压强越小时, 全钢化真空玻璃通过残余气体的热导越小。真空玻璃在实际生产过程中, 需进行高温烘烤, 将真空间隔层内的残余气体及玻璃表层内的气体尽可能全部排出, 使得真空间隔层内的压力降到最低, 即残余气体的热导也降到了最低, 几乎对整个全钢化真空玻璃传热没有影响, 因此残余气体的热导可忽略不计。

3. 模糊综合评价法

3.1. 评价因素指标体系分析

模糊决策是采用模糊数学理论对目标模糊的对象系统做出定量决策的一种方法。由于单个指标不能全面反映方案的优劣，需用多个指标来反映，因此需要进行模糊综合评价。

在建立评价因素指标体系时，需精心筛选指标，把次要的、对最终决策影响小的指标删除；所选指标内容要能完全衡量待评价目标的价值水平；尽可能用最少的指标维数来全面描述待评价目标方案；单个指标对待评价目标的描述只有一次；指标的选取对待评价目标要有实际意义。

通过对全钢化真空玻璃传热系数的影响因素研究，选取支撑物高度、支撑物形状、支撑物材料、支撑物布放间距、支撑物排布方式、全钢化玻璃厚度和有效辐射率作为评价因素指标。从洛阳兰迪玻璃机器股份有限公司选取五种全钢化真空玻璃方案，通过模糊综合评价法来优选出保温性能更好的全钢化真空玻璃，五种方案的结构参数如表 2 所示。

Table 2. Five fully tempered vacuum glass solutions

表 2. 五种全钢化真空玻璃方案

方案	支撑物高度/mm	支撑物形状	支撑物材料	支撑物布放间距/mm	支撑物排布方式	全钢化玻璃厚度/mm	有效辐射率
B1	0.24	圆柱	304 不锈钢	50	正六边形	5	0.036
B2	0.26	圆柱	氧化铝陶瓷	40	正六边形	6	0.040
B3	0.18	圆柱	氧化铝陶瓷	70	正三角形	5	0.025
B4	0.22	圆环	镍基合金	60	正方形	4	0.030
B5	0.16	圆环	304 不锈钢	80	正方形	6	0.020

3.2. 模糊评价矩阵的构建

针对五种全钢化真空玻璃传热系数的影响因素，采用模糊综合评价中的定量指标综合决策法来确定模糊评价矩阵。由于评价因素指标中含有定性指标，需先将评价因素指标中的定性指标转化为定量指标，然后再通过定量指标综合决策法来确定模糊评价矩阵。

由表 2 可知，支撑物高度、支撑物布放间距、全钢化玻璃厚度和有效辐射率为定量指标，而支撑物形状、支撑物材料和支撑物排布方式为定性指标。首先要对定性指标进行定量化处理，通过映射量间接的表征系统行为：支撑物的形状用单个支撑物与玻璃的接触面积来表示，支撑物材料用支撑物材料的导热系数来表示，支撑物排布方式用单位面积支撑物的数量来表示。表 3 为定量化后的五种方案的结构参数。

Table 3. Five fully tempered vacuum glass schemes after quantification

表 3. 定量化后的五种全钢化真空玻璃方案

方案	支撑物高度/mm	接触面积/mm ²	材料导热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	支撑物布放间距/mm	每平方米数量	全钢化玻璃厚度/mm	有效辐射率
B1	0.24	0.126	16.3	50	312	5	0.036
B2	0.26	0.071	20.0	40	479	6	0.040
B3	0.18	0.096	20.0	70	247	5	0.025
B4	0.22	0.114	14.2	60	289	4	0.030
B5	0.16	0.147	16.3	80	169	6	0.020

设 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为 n 个待评价方案集合, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 为 m 个因素指标集合, v_{ij} 为第 j 个方案的第 i 个因素指标值, $i = 1, 2, \dots, m$ 。 n 个待评价方案的因素指标向量组成因素指标矩阵:

$$V^* = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

已知有五种待评价的全钢化真空玻璃方案, 记为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, 各个方案有 7 个因素指标, 记为 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\}$, 五种待评价方案的因素指标向量组成的因素指标矩阵为:

$$V^* = \begin{bmatrix} 0.24 & 0.26 & 0.18 & 0.22 & 0.16 \\ 0.126 & 0.071 & 0.096 & 0.114 & 0.147 \\ 16.3 & 20.0 & 20.0 & 14.2 & 16.3 \\ 50 & 40 & 70 & 60 & 80 \\ 312 & 479 & 247 & 289 & 169 \\ 5 & 6 & 5 & 4 & 6 \\ 0.036 & 0.040 & 0.025 & 0.030 & 0.020 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于各因素指标之间量纲不同, 导致各因素指标不能相互比较, 为了统一各因素指标的量纲, 需对各因素指标数值进行无量纲化处理, 消除各因素指标因量纲不同而对评价结果带来的影响。由于各个因素指标中有些是其值越大对方案越好(正向指标), 有些反而是值越小对方案越好(逆向指标), 对于后者需先进行同趋势化处理, 转化成正向指标, 然后再进行无量纲化处理。

对正向指标采用极差法无量纲化, 计算如下:

$$v'_{ij} = \frac{v_{ij} - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \times 0.9 + 0.1 \quad (9)$$

式中: v'_{ij} 为无量纲化后某一因素指标的值; v_{ij} 为无量纲化前某一因素指标的值; v_{\min} 为无量纲化前某一因素指标的最小因素指标值; v_{\max} 为无量纲化前某一因素指标的最大因素指标值。

对逆向指标的无量纲化只需将正向指标极差法无量纲化中的 $v_{ij} - v_{\min}$ 换成 $v_{\max} - v_{ij}$ 即可, 计算如下:

$$v'_{ij} = \frac{v_{\max} - v_{ij}}{v_{\max} - v_{\min}} \times 0.9 + 0.1 \quad (10)$$

根据全钢化真空玻璃传热系数的影响因素分析可知, 支撑物的高度、支撑物布放间距和全钢化玻璃厚度为正向指标, 单个支撑物与玻璃的接触面积、支撑物材料的导热系数、单位面积支撑物的数量和有效辐射率为逆向指标。将各方案的因素指标数值通过极差法进行无量纲化处理, 各方案的因素指标数值构成的矩阵为模糊评价矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0.820 & 1.000 & 0.280 & 0.640 & 0.100 \\ 0.349 & 1.000 & 0.704 & 0.491 & 0.100 \\ 0.674 & 0.100 & 0.100 & 1.000 & 0.674 \\ 0.325 & 0.100 & 0.775 & 0.550 & 1.000 \\ 0.585 & 0.100 & 0.774 & 0.652 & 1.000 \\ 0.550 & 1.000 & 0.550 & 0.100 & 1.000 \\ 0.280 & 0.100 & 0.775 & 0.550 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.3. 评价因素指标权重的确定

采用层次分析法(AHP)确定主观权重, AHP 法是对一个复杂的多目标决策问题进行分析, 将目标分解为多个准则, 再分解为多指标的若干层次, 通过定性和定量的结合进行评估, 将各因素按照影响权重排出优劣次序, 最终将各因素对目标结果的影响程度作为决策的主要依据。AHP 的计算步骤如下:

3.3.1. 递阶层次结构的建立

层次分析法将有关因素按照逻辑隶属关系自上而下分为三个主要层次: 目标层, 即为决策目标, 通常只有一个指标; 准则层, 是由影响决策目标的各个指标构成; 方案层, 是由准备评估的各个方案组成的。

3.3.2. 构造两两比较判断矩阵

邀请相关专家对同一层的相关因素进行两两重要性对比, 得出结论并打分。对于 n 个指标来说, 得到两两比较判断矩阵为:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (12)$$

两两比较判断矩阵具有如下性质:

$$a_{ij} > 0 \quad (13)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (14)$$

$$a_{ii} = 1 \quad (15)$$

层次分析法的重点就是如何将模糊性的概念定量化, 用数值来表示该准则的优劣性。采用 T.L.Saty 所提出的 1~9 标度表, 对不同情况给出定量化标准, 如表 4 所示。

Table 4. Scale of the importance of factors

表 4. 因素指标比较标度表

标度	含义
1	表示两个因素指标相比, 具有同样重要性
3	表示两个因素指标相比, 一因素指标比另一因素指标稍微重要
5	表示两个因素指标相比, 一因素指标比另一因素指标明显重要
7	表示两个因素指标相比, 一因素指标比另一因素指标强烈重要
9	表示两个因素指标相比, 一因素指标比另一因素指标极端重要
2、4、6、8	为上述相邻判断的中值

3.3.3. 计算因素指标的权重

根据两两比较判断矩阵求解出最大特征根和特征向量如下:

$$AM = \lambda_{\max} M \quad (16)$$

式中, A 为两两比较判断矩阵; M 为两两比较判断矩阵最大特征根对应的特征向量; λ_{\max} 为最大特征值。

采用平方根法来求解两两比较判断矩阵最大特征根对应的特征向量如下:

$$m_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (17)$$

式中: m_i 为两两比较判断矩阵最大特征根对应特征向量中的第 i 个值, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

联立式(16)和(17), 得到两两比较判断矩阵最大特征根对应特征向量为:

$$\mathbf{M} = [m_1, m_2, \dots, m_n]^T \quad (18)$$

式中: \mathbf{M} 为两两比较判断矩阵最大特征根对应特征向量。

将式(18)中的数值进行归一化处理后, 得到因素指标主观权重向量为:

$$\mathbf{W}_1 = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \quad (19)$$

式中: \mathbf{W}_1 为因素指标主观权重集。

3.3.4. 一致性检验

① 计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \quad (20)$$

式中: CI 的值越接近于 0, 表明判断矩阵越接近完全一致。

② 查找随机一致性指标系数 RI , 如表 5 所示。

Table 5. Random consistency index coefficients

表 5. 随机一致性指标系数表

判断矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	...
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	...

③ 计算一致性比例 CR 如下:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (21)$$

式中: 当 $CR < 0.1$ 时, 则通过一致性检验。

采用层次分析法对全钢化真空玻璃传热系数的影响因素建立递阶层次结构图, 由于本文层次分析法只用来确定评价因素指标权重, 因此只建立目标层和准则层, 如图 3 所示。

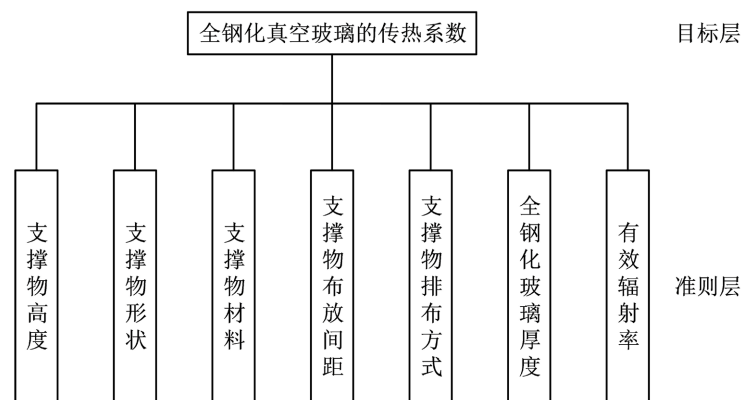


Figure 3. Hierarchical model structure of heat transfer coefficient of fully tempered vacuum glass

图 3. 全钢化真空玻璃传热系数层次模型结构图

通过企业专家对这 7 种因素指标进行两两相互比较, 得到此 7 种因素相对于全钢化真空玻璃传热系数的比较判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1/3 \\ 3 & 1 & 2 & 1/2 & 1/2 & 3 & 2 \\ 4 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 1/2 & 3 & 2 \\ 4 & 2 & 3 & 2 & 1 & 4 & 3 \\ 2 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1/2 \\ 3 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

通过 SPSS 软件分析计算得出比较判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = 7.281$ ，最大特征值对应特征向量为：

$$M = [0.332, 1.141, 0.954, 1.388, 2.053, 0.437, 0.696]^T \quad (23)$$

评价因素指标主观权重向量为：

$$W_1 = [0.047, 0.163, 0.136, 0.198, 0.293, 0.062, 0.099]^T \quad (24)$$

由于 $CI = 0.047$ ， $RI = 1.36$ ，计算可得 $CR = 0.034 < 0.1$ ，则两两比较判断矩阵通过一致性检验。

评价因素指标主观权重集为：

$$W = (0.047, 0.163, 0.136, 0.198, 0.293, 0.062, 0.099) \quad (25)$$

3.4. 模糊综合评价模型

在模糊综合评价的全钢化真空玻璃传热系数的模型中，采用加权平均模型 $M(\cdot, +)$ 对各方案进行决策，加权平均模型根据各因素权重的大小对所有因素都进行了考虑，比较适用于要求总和最大的情形。该模型的特点主要有两点：一是在确定评语对模糊综合评价集的隶属度时，考虑了所有因素的影响；二是由于同时考虑到所有因素的影响，所以各因素重要程度系数的大小具有刻画各因素重要性程度的权系数的意义。

模糊综合评价集计算如下：

$$B = W \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (26)$$

式中： B 为模糊综合评价集； W 为因素重要程度模糊集； R 为模糊评价矩阵； b_j 为待评价方案 V_j 对综合评判所得模糊评价集 B 的隶属度， $j = 1, 2, \dots, n$ ； n 为待评价方案的个数。

3.5. 模糊综合评价结果

将式(4-11)和式(4-35)代入式(4-36)可得：

$$B = W \cdot R = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) = (0.485, 0.345, 0.633, 0.607, 0.765) \quad (27)$$

由于 $b_5 = \max \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ ，故由最大隶属度原则可知 b_5 所对应的方案 5 为最优方案。

4. 模糊综合评价模型的试验验证

通过全钢化真空玻璃的传热系数测量试验，验证模糊综合评价模型在评价全钢化真空玻璃保温性能优劣方案的可行性。

4.1. 试验原理

《真空玻璃》(JC/T 1079-2008)基于热流计法可直接测量全钢化真空玻璃中心区域的热导，然后将测量的试验结果数据代入换算公式求出全钢化真空玻璃的传热系数。由于合格的全钢化真空玻璃产品残余

气体的热导对整个全钢化真空玻璃的传热系数的影响很小，可忽略不计，而该标准的传热系数的试验没有计入真空玻璃残余气体的热导，符合试验要求。

利用真空玻璃热导仪对全钢化真空玻璃的传热系数进行测量，该仪器由冷板、同心缓冲隔离环、金属测量头、标准板、热板和箱体保温材料等组成。图 4 为热导仪设备，该设备是由洛阳兰迪玻璃机器股份有限公司自制。



Figure 4. Diagram of the thermal conductivity device
图 4. 热导仪设备图

在测试时，金属测量头的上、下两表面需紧贴待测试样的下表面和标准板的上表面，标准板放在热板上，热板是一块带有加热控温器的金属平板，待测试样的上表面是冷板，冷板是一块带有制冷器的金属平板。由傅里叶定律可知，在温差作用下，热量自发地从热板流向标准板，再向金属测量头，最后经待测试样流向冷板。当待测试样处于热平衡状态时，热流恒定，金属测量头的温度稳定在 T_u 。图 5 为热导仪测量原理图。

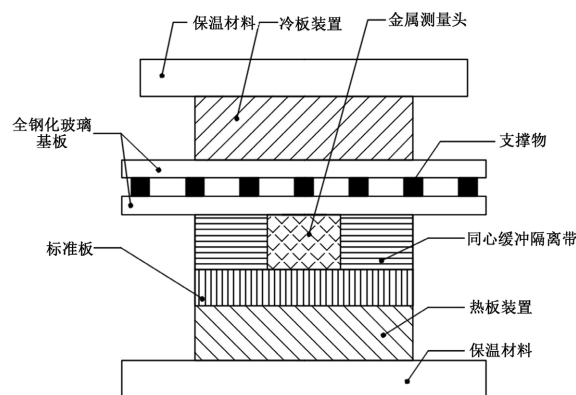


Figure 5. Schematic diagram of the thermal conductivity measurement
图 5. 热导仪测量原理图

由于热导仪测量装置各部件自上而下是串联的，部件之间的温差与热阻成正比，与热导成反比。由图 5 可知，待测试样温差为 $T_u - T_c$ ，标准板温差为 $T_h - T_u$ 。待测全钢化真空玻璃的热导动态平衡方程为：

$$C_u = \frac{T_h - T_u}{T_u - T_c} \times C_s \quad (28)$$

式中： C_u 为待测试样热导； T_h 为热板温度； C_s 为标准板热导的数值，单位 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，取 $C_s = 16.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ； T_c 为冷板温度； T_u 为金属测量头温度。

得到待测试样的热导值后，需对其数值进行修正，修正后数值为待测试样的实际热导测量值，修正

公式如下:

$$C_{rad} = \varepsilon_{eff} \times \sigma \times \frac{T_u^4 - T_c^4}{T_u - T_c} \quad (29)$$

$$C'_u = C_u - C_{rad} + C_{rad} \times \left(\frac{272}{\frac{T_u + T_c}{2} + 273} \right)^3 \quad (30)$$

式中: C_{rad} 为待测试样的辐射热导; ε_{eff} 为待测试样的有效辐射率; σ 为斯忒藩 - 玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; C'_u 为待测试样修正后的热导。

待测试样的传热系数与其热导的换算公式为:

$$U = \left(\frac{1}{8.7} + \frac{1}{C'_u} + \frac{1}{23} \right)^{-1} \quad (31)$$

式中: U 为待测试样的传热系数, 按 GB/T 8170-2008 修约到小数点后两位。

4.2. 试验过程

试验环境严格按照标准要求来执行, 室内环境温度控制在 $22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度控制在 20%~75%。

① 试验开始之前, 先用浸有无水乙醇的柔软、清洁、干燥的布或者无尘纸擦拭待测全钢化真空玻璃, 保持待测全钢化真空玻璃表面的清洁;

② 检查热导仪测量装置使用情况是否正常, 试验环境温度和湿度是否达到要求;

③ 试验环境和试验设备检查完成后, 将标准板正确布放在热板上方, 而待测全钢化真空玻璃布放在冷板与标准板之间, 待测全钢化真空玻璃上、下表面分别与冷板下表面和金属测量头上表面紧密贴合, 保证待测全钢化真空玻璃边部与金属测量头的距离大于 50 mm;

④ 利用制冷器将冷板温度设为 10°C , 而热板通过加热控温器将其温度设为 40°C , 然后对金属测量进行加热, 使其温度达到设定值, 三者的温度应稳定在 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 内;

⑤ 当热流趋于平稳, 仪器示数稳定后, 记录此时金属测量头的温度和仪器热导示数;

⑥ 将已测全钢化真空玻璃更换为新的待测全钢化真空玻璃试样, 新的待测试样按步骤 1~4 继续进行试验, 直至五种全钢化真空玻璃样品测试结束;

⑦ 在整个试验完成后, 关闭热导仪仪器的电源。

4.3. 试验结果分析

严格按照上述试验过程对五种全钢化真空玻璃进行, 将得到的试验相关数据代入公式, 即可求解全钢化真空玻璃的传热系数, 表 6 为最终得到的五种全钢化真空玻璃的相关试验数据。

Table 6. Test data for five types of fully tempered vacuum glass

表 6. 五种全钢化真空玻璃的试验数据

方案	T_u/K	$C'_u/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$C_{rad}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$C'_u/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$U/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
B1	311.76	0.785	0.215	0.593	0.54
B2	311.78	0.773	0.239	0.560	0.51
B3	312.00	0.644	0.150	0.510	0.47
B4	311.91	0.697	0.180	0.537	0.49
B5	312.13	0.569	0.120	0.462	0.43

从表 6 得出五种全钢化真空玻璃的传热系数值排序为： $B5 < B3 < B4 < B2 < B1$ 。结果表明：第五种全钢化真空玻璃的传热系数最小，该方案的保温性能最好，在全钢化真空玻璃传热系数方案的优选中应作为首选。五种全钢化真空玻璃的传热系数试验得出的结果与模糊综合评价模型的综合评价结果相一致，验证了全钢化真空玻璃传热系数模糊综合评价模型的有效性。

5. 结论

- 1) 通过对全钢化真空玻璃传热系数的影响因素进行分析，得出真空间隔层内的残余气体对整个全钢化真空玻璃传热影响不大，可忽略不计；
- 2) 建立了全钢化真空玻璃传热系数的模糊综合评价模型，结果表明第五组方案的保温性能最好；
- 3) 采用全钢化真空玻璃的传热系数检测试验验证了模糊综合评价模型的可行性；
- 4) 为全钢化真空玻璃传热系数的优选提供了理论依据，对制备出热工性能较好的全钢化真空玻璃产品具有一定的理论指导意义和实际应用价值，也为建筑外窗带来的建筑能耗问题提供了解决方案。

基金项目

河南省创新示范专项资助项目(191110211600)；河南省高等学校重点科研项目计划(19A460020)。

参考文献

- [1] 赵本玉. 绿色可持续发展的装配式建筑节能减排思考[J]. 陶瓷, 2022(3): 154-156.
- [2] 王欣怡. 关于我国建筑节能设计措施的相关探讨[J]. 节能, 2018, 37(12): 3-5.
- [3] 侯志红, 朱福文. 窗玻璃节能技术进展[J]. 玻璃, 2015, 42(12): 46-50.
- [4] 王晋珍. 助力建筑节能再披“玻璃新衣”[J]. 中国建材, 2021(2): 104-106.
- [5] 李宏彦. 被动房中全钢化真空玻璃成为节能减霾利器[J]. 建设科技, 2016(17): 52-56.
- [6] 张红霞. 基于真空玻璃特性的节能定制方案[J]. 玻璃, 2020, 47(4): 36-40.
- [7] Tk, A., Sm, B., Ara, C., *et al.* (2020) Thermal Performance Analysis of a New Structured-Core Translucent Vacuum Insulation Panel in Comparison to Vacuum Glazing: Experimental and Theoretically Validated Analyses. *Solar Energy*, **199**, 326-346. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.030>
- [8] Shi, Y., Xi, X., Zhao, G., *et al.* (2022) Sealing Performance of Tempered Vacuum Glazing with Silver Oxide System Low Melting Solder. *Materials Chemistry and Physics*, **275**, Article ID: 125202. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125202>
- [9] 韩乐. 玻璃在建筑节能中应用浅析[J]. 玻璃, 2020, 47(7): 59-62.
- [10] 谢季坚. 模糊数学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [11] 李柏年. 模糊数学及其应用[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2007: 4-5.
- [12] 赵东亚, 卢帆, 曹磊, 等. 基于模糊综合评价的烟道气辅助 SAGD 过程评价[J]. 化工进展, 2021, 40(1): 89-98.
- [13] 黄广全, 肖莉明, 金传喜, 等. 多目标模糊综合评价的数控机床元动作单元关键质量特性识别[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 1062-1078.
- [14] Li, X., Wan, R., Wu, B., *et al.* (2021) Risk Assessment of the Construction of Metro Stations with Open Cut Method Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **636**, Article ID: 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/636/1/012029>
- [15] 刘海江, 徐新胜, 李敏. 双离合自动变速器车辆换挡品质模糊综合评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(7): 43-51.
- [16] 许国栋, 李地红, 吴昊宇, 等. 模糊评价法表征复合材料层合板低能量冲击行为[J]. 材料导报, 2018, 32(S2): 573-576.
- [17] 王双华, 张恒. 机械功能微晶玻璃可加工性能的模糊综合评价[J]. 材料导报, 2009, 23(20): 115-117.
- [18] 广东省建筑科学研究院、广东省建筑工程集团有限公司. JGJ/T 151-2008, 建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

- [19] Technical Committee CEN/TC 129 (2011) EN 673-2011, Glass in Building-Determination of Thermal Transmittance (U Value)-Calculation Method. British Standards Press, Brussels.
- [20] Standing Standard Project Committee (SSPC) (2001) ASHRAE 62-2001, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. American Standards Press, Georgia.